航炮冲击波作用下的直升机模拟台架数值仿真

查建平,陈英华,朱帅

(中国直升机设计研究所,333001 景德镇)

摘　要:直升机航炮在发射时形成的强烈冲击波不仅对周边结构构成损伤,产生的炮振环境还会导致附近设备的失效和损坏,航炮的机弹相容设计一直是武装直升机研制过程中的难点问题。本研究基于经典的爆炸力学理论和某航炮地面靶试实测结果,对炮口冲击波形成的压力场进行了数值拟合,同时考虑冲击波正压时间的差异性,分别建立了超压分布的空间场与时间脉冲场。根据模拟台架与航炮的结构方案,在有限元软件中对炮口冲击波形成的超压扩散过程进行了模拟,然后利用非线性瞬态分析方法,对直升机模拟台架在超压作用下的冲击过程进行了仿真,分析了台架蒙皮、骨架以及连接结构的动态响应变化规律,可以为地面台架的尺寸设计和结构优化提供依据。

关键词:航炮;冲击波;直升机;地面台架;数值仿真

中图分类号:V214.1　　**文献标志码:**A

Numerical simulation of helicopter simulation platform under the action of aerial gun shock wave

ZHA Jianping,CHEN Yinghua,ZHU Shuai

(Chinese Helicopter Research and Develpoment Institute,333001 Jingdezhen,China)

Abstract: The strong shock wave generated by the helicopter gun during launch not only damages the surrounding structure,but also causes the failure and damage of nearby equipment,the compatibility design of aerial gun with projectile is always a difficult problem in the development of armed helicopter. Based on the classical theory of explosion mechanics and the measured results of an aerial gun ground target,the pressure field generated by the muzzle shock wave is simulated numerically,and the difference of the time of the positive pressure of the shock wave is considered,the space field and time pulse field of overpressure distribution are established respectively. According to the structure scheme of the simulation platform and the aerial gun,the overpressure diffusion process of the muzzle shock wave is simulated in the finite element software,and then the nonlinear transient analysis method is used,the impact process of helicopter platform under overpressure is simulated,and the dynamic response of skin,frame and connecting structure is analyzed,which can provide reference for the design and structure optimization of ground platform.

Key words:aerial gun; shock wave; helicopter;ground platform;numerical simulation

收稿日期:2022-03-22　　**修回日期:**2022-05-30

基金项目:基础加强研究项目(No. KT/JC/HPJC-2020)

通信作者:陈英华,高级工程师。E-mail:cyhj2336@163.com

引用格式:查建平,陈英华,朱帅. 航炮冲击波作用下的直升机模拟台架数值仿真[J]. 应用力学学报,2022,39(4):627-632.

ZHA Jianping,CHEN Yinghua,ZHU Shuai. Numerical simulation of helicopter simulation platform under the action of aerial gun shock wave [J]. Chinese journal of applied mechanics,2022,39(4):627-632.

航炮作为航空器机载的重要武器,在近距作战、对地打击等方面发挥着重要作用,已经成为现代武装直升机的必备装备之一[1]。航炮发射形成的强烈冲击波、温度场和噪声波等往往引起周边结构的疲劳破坏,甚至导致机载设备的失效和损坏[2]。为此,航炮的机弹相容问题已经成为飞行器设计中的重大风险项之一。关于航炮设计,国外的研究相对较早,已形成了完善的理论体系[3-4],国内的相关研究起步较晚,早期主要采用数值计算和试验的方法,对膛口冲击波的传播规律进行了研究。李鸿志等[5]采用高精度 Godunov 格式,对膛口冲击波在远场的传播过程进行了数值模拟,得到了动球心球形波特征的冲击波结果,给出了超压在传播过程中呈指数衰减的规律。郭则庆等[6]基于 ALE 方程的有限元体积法,对比计算了有无初始流场的复杂形状弹丸在膛口的流场发展过程,结果表明初始流场是火药燃气流场形成冠状冲击波的必要条件;随后,又对高马赫数下机翼内埋航炮流场进行了计算,指出高速飞行时膛口会形成由火药燃气冲击波、分离激波、滑移面等波系构成的流场结构,分离激波尺寸和冲击波超压峰值均与马赫数有关[7]。朱冠南等[8-9]分别采用高、低压舱装置,在实验室进行了步枪膛口冲击波的压力测试试验,测得不同压力下膛外多点处的压力曲线,通过数值拟合,给出了指数衰减的近似公式,并对比分析了环境压力对冲击波强度的影响。

随着计算机和有限元技术的发展,基于三维流场分析的复杂工程结构冲击波结构响应分析与优化成为当前的趋势,被广泛用于制退器[10]、炮车[11]、装甲车[12]、舰载航炮[13]等相关结构[14-17]的设计。但对于航炮,特别是直升机航炮设计,工程上多依赖于试验,缺乏有效的分析手段。

为了对某航炮装机冲击波影响进行分析,本研究首先基于文献中的理论和经验公式,对实测炮口冲击波的空间压力场进行数值拟合,并采用非线性瞬态分析方法,对某直升机模拟试验台架在冲击波作用下的结构响应进行数值仿真,基于分析模型,开展了有关参数的影响分析,用于台架的尺寸设计与优化。

1 炮口冲击波分布

1.1 超压分布

国内学者通过数值方法对膛口气场的形成、流动过程进行了模拟,基本确定了炮口冲击波的远场传播规律[5],并通过相关的枪击和炮击试验[8-9]进行了验证,给出了膛口冲击波超压在不同角度射线上呈幂函数衰减的规律,参考上述文献,幂函数形式如下。

$$\Delta P = K_\theta r^{-a_\theta} \tag{1}$$

其中:ΔP 为超压值(kPa);K_θ 为起始冲击波超压值;a_θ 为超压值衰减率;r 为测点到炮口直线距离与炮口直径的比值。

1.2 正压时长

炮口冲击波传播到空间任意点的压力场强度,除了扩散角度的衰减外,另一个关键参数为正压的作用时间,由爆炸相似律[15-16]可知,炸药爆炸空中冲击波的正压时长满足

$$\frac{t_+}{\sqrt[3]{m}} = g\left(\frac{d}{\sqrt[3]{m}}\right) \tag{2}$$

式中:t_+ 为冲击波正压作用时间(ms);m 为 TNT 装药量(kg);d 为炮口距离(m);定义$\frac{d}{\sqrt[3]{m}} = \bar{d}$为比例距离。

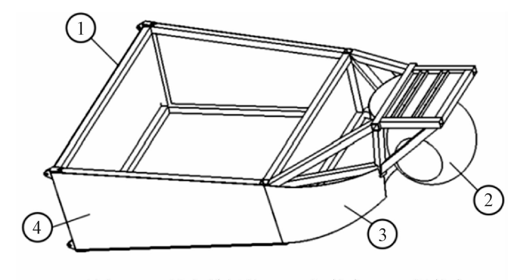
文献[18]根据实测的试验数据对近地面空中爆炸冲击波正压时间进行了数值拟合,并与其他文献中结果进行了对比验证,给出了更为精确的关系式为

$$\frac{t_+}{\sqrt[3]{m}} = -0.74 + 0.97\bar{d} - 0.04\bar{d}^2, 1 \leqslant \bar{d} \leqslant 10 \tag{3}$$

2 数值模型

2.1 动力学模型

以某直升机模拟台架结构为分析对象,台架由骨架、蒙皮及设备模拟件组成。其中骨架为 Q235 钢制的标准方管,蒙皮分别采用钢板和铝板。连接均采用焊接形式,设备模拟件为木制材料,通过 4 个螺栓安装在台架前部平台。台架的结构模型如图 1 所示。



1—骨架; 2—设备模拟件; 3—钢蒙皮; 4—铝蒙皮

图 1 直升机模拟试验台架结构方案

Fig. 1 The scheme of test platform for simulating helicopter structure

对上述结构进行动力学建模。骨架采用梁单元，蒙皮和设备模拟件采用 2D 壳单元，模型中单元尺寸为 10 mm。材料包括 Q235 钢和 2A12 铝板，考虑结构大变形，在模型中创建金属材料的应力-应变曲线，分析时采用非线性材料本构。

2.2 材料非线性

金属材料在大变形过程中可以分为弹性段和塑性段，其中，弹性段内，应力-应变存在一一对应关系，由胡克定律可知

$$\sigma_{ij} = \lambda\delta_{ij}\varepsilon_{ii} + 2G\varepsilon_{ij} \tag{4}$$

$$\lambda = vE/(1+v)(1-2v) \tag{5}$$

$$G = E/2(1+v) \tag{6}$$

其中：λ 为拉梅系数；G 为剪切模量；E 为弹性模量；v 为泊松比。

当进入塑性变形阶段，载荷卸去存在残余变形，此时，应力-应变之间不存在唯一的对应关系，曲线如图 2 所示。

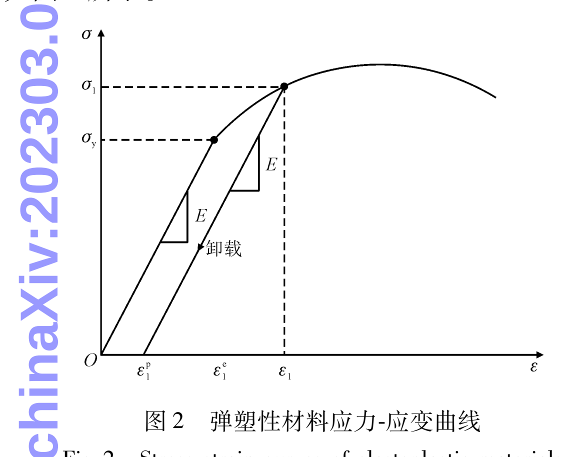


图 2 弹塑性材料应力-应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curves of elastoplastic materials

对于不可压缩材料，应变 ε 和真实应力 σ_{true} 满足

$$\sigma_{true} = \sigma_{eng}(1+\varepsilon) \tag{7}$$

式中 σ_{eng} 为工程应力。

对于各向同性的金属材料，本研究中采用 Von Mises屈服准则、关联流动准则和各向同性硬化定律对材料本构进行描述。

根据实际的试验边界，约束台架后端面 4 个接头的所有平动自由度，建立的动力学模型如图 3 所示。

2.3 压力场拟合

某航炮地面靶试试验时，采用地面刚性基础对炮身进行固定，炮口为自由端，便于冲击波自由扩散。在离炮口中心不同射角和距离处布置压力传感器，实测航炮发射时的冲击波超压峰值，测点位置如图 4 所示。

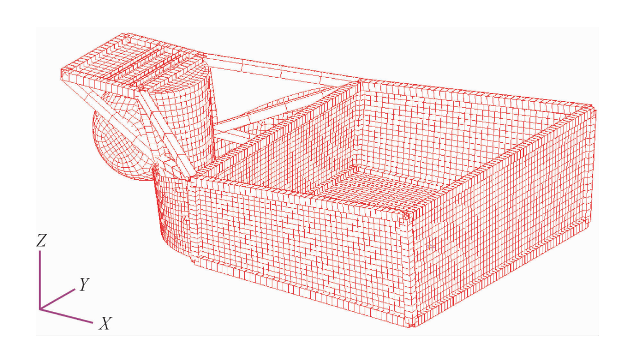


图 3 直升机模拟试验台架动力学模型

Fig. 3 Dynamics model of helicopter simulation test platform

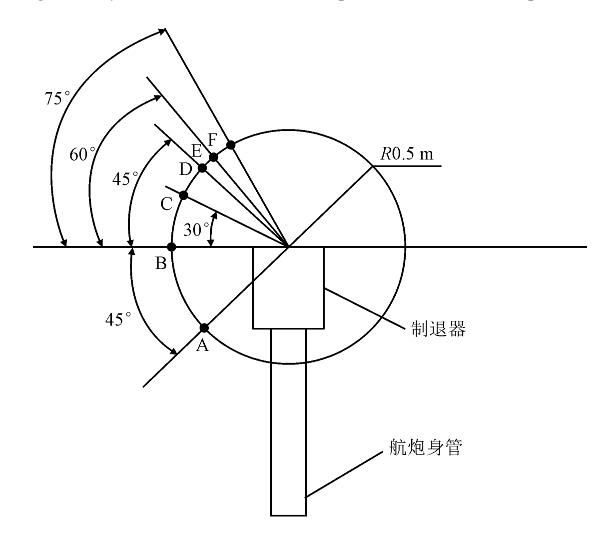


图 4 地面靶试超压测点布置

Fig. 4 Location of overpressure sensors in ground test

对地面靶试试验的冲击波实测结果进行处理，得到不同角度和不同炮口距离处测点的超压值。超压值与炮口距离比和扩散角度的关系如图 5 所示。

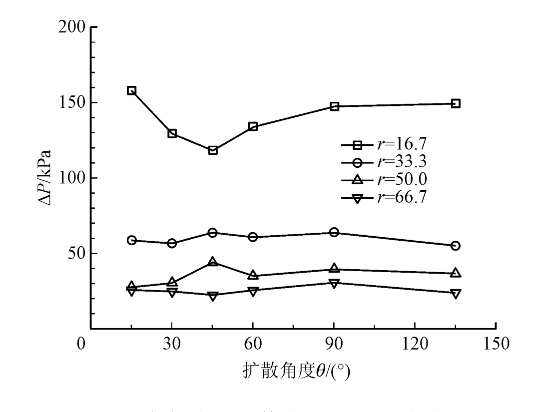


图 5 炮口冲击波超压值与距离比和角度的对比

Fig. 5 The overpressure of muzzle shock wave varies with the distance ratio and angle

采用式(1)中表达式,对上图中航炮发射冲击波的实测压力场进行最小二乘法拟合,计算了幂函数不同扩散角度下的参数,结果如表1所示。

表1 航炮冲击波实测超压幂函数拟合结果

Tab. 1 Results of power function fitting of actual measured shock wave overpressure

序号	角度/(°)	K_θ	a_θ	残差平方和(RSS)
1	15	8 937.8	1.434	0.000 6
2	30	3 755.3	1.196	0.001 4
3	45	1 444.0	0.890	0.002 2
4	60	3 334.4	1.142	0.000 1
5	90	4 455.3	1.211	0.000 6
6	135	8 534.7	1.438	0.006 3

拟合的冲击波曲线与实测值的对比如图6所示。

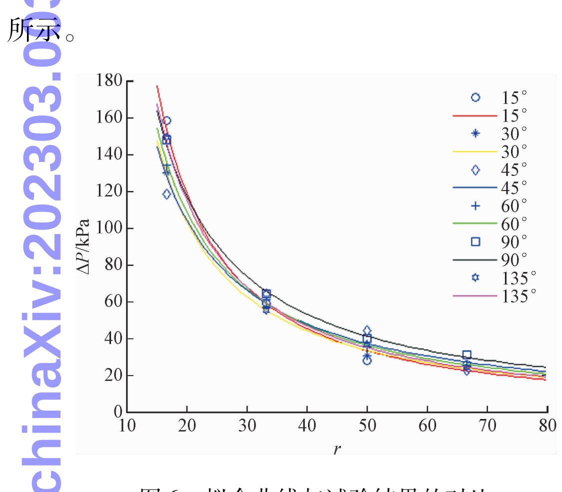


图6 拟合曲线与试验结果的对比

Fig. 6 Comparison of fitting curve and test results

2.4 超压时长

考虑冲击波正压作用时长的影响,根据离炮口的角度和距离,将台架结构的压力场作用区进行划分。航炮在对称面内向上10°角发射,按角度和距离将台架底部蒙皮分为22个区域,具体分区与编号如图7所示。

选择式(3)函数,对航炮炮口冲击波作用到台架结构的作用时长进行了计算。以图7中的蒙皮区域I为例,航炮发射药的TNT当量 $m=0.05$ kg,炮口距离 $d=0.4$ m,得到正压作用时间 $t_+=0.136$ ms。同理,可以计算得到台架蒙皮其他分区的正压时长。

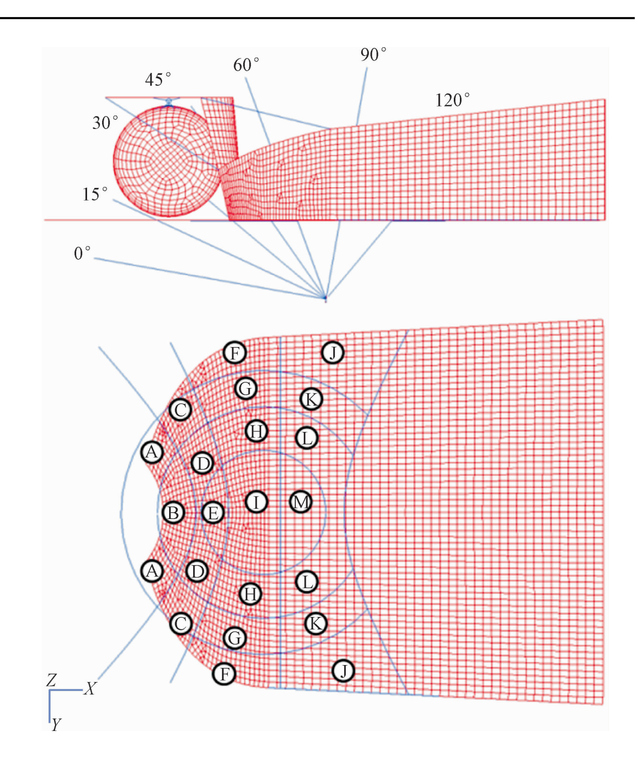


图7 炮口冲击波角度与压力场分区

Fig. 7 Division of muzzle shock wave with angle and pressure field

3 冲击波仿真

在MCS. Patran软件中,采用静力试验数据,建立金属材料的应力-应变曲线,如图8所示。

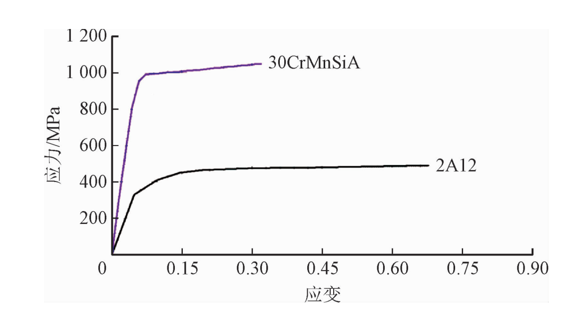


图8 金属材料实测应力-应变曲线

Fig. 8 Measured stress-strain curves of metallic materials

选择Nastran非线性瞬态SOL129求解器,对台架在冲击波作用下的动响应进行分析[19]。按上节分区分别建立空间场和冲击波瞬态压力载荷,不同时刻下结构表面的压力分布变化如图9所示。

从压力场的变化情况可以看出,炮口冲击波初始时刻以球形形状进行扩散,最先到达离炮口最近的蒙皮中心位置,随后向外扩散,同时,由于火药燃

气形成的冠状冲击波作用,超压中心沿发射方向往前扩散[5],由于正压时长的影响,随着距离的增加,压力的持续时间也随着增大。

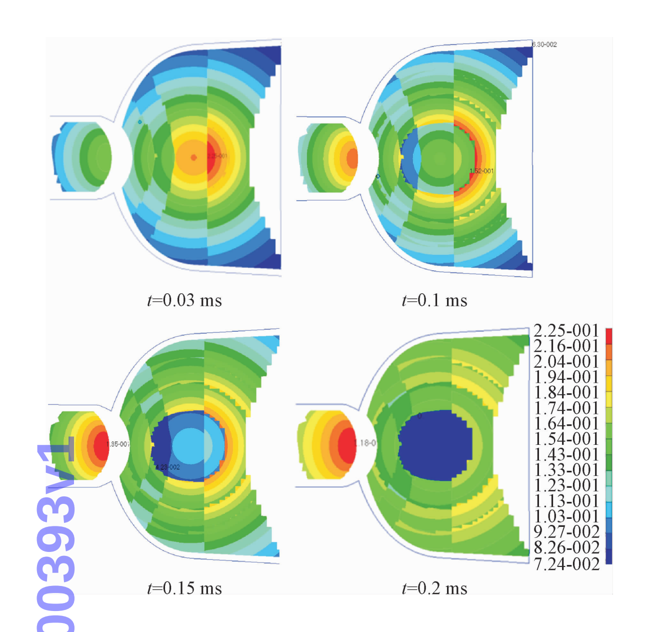


图 9 不同时刻结构表面的压力场分布(单位:MPa)

Fig. 9 Pressure field distribution on structure surface at different moments (unit:MPa)

设置结构阻尼系数为0.01,步长为0.005 ms,总时长 5 ms,对台架的动响应进行了仿真,台架最大的变形和等效应力如图 10 和图 11 所示。

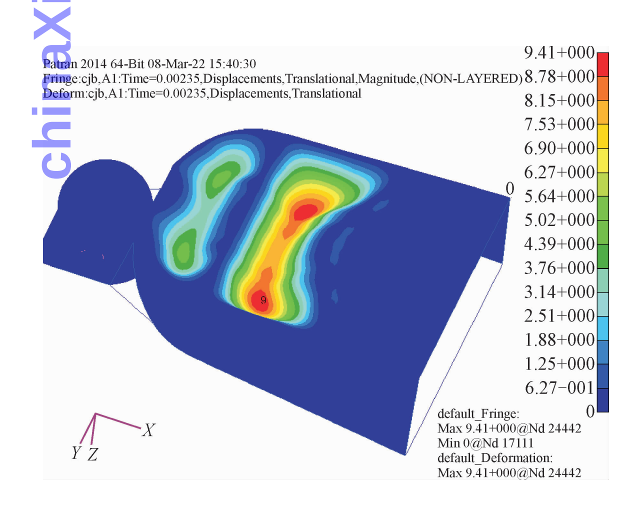


图 10 台架最大变形云图

Fig. 10 Fringes of the maximum deformation of the platform

从结果可知,最大变形位于铝蒙皮靠近中间骨架的区域,幅值为9.41 mm,对应的时刻为2.35 ms;同时,最大等效应力为162 MPa,危险部位位于钢制蒙皮与中间骨架焊接区域。将台架各部件的最大变形与等效应力汇总见表 2 所示。

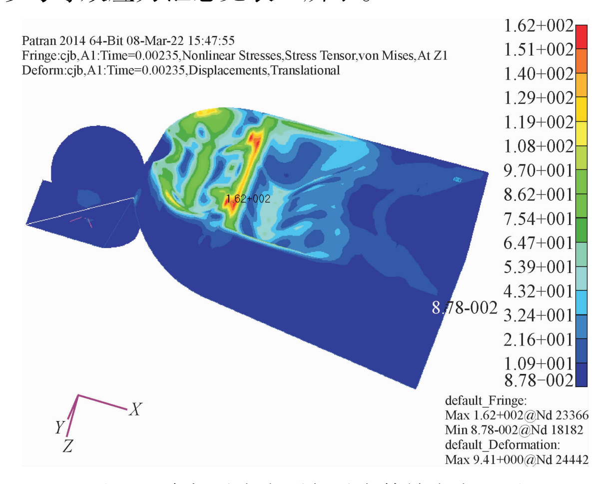


图 11 台架最大变形与最大等效应力云图

Fig. 11 Fringes of the maximum equivalent stress of the platform

表 2 台架各部件的最大变形与最大等效应力

Tab. 2 The maximum deformation and equivalent stress of the platform

部件	底蒙皮	侧蒙皮	骨架	设备假件
最大变形/mm	9.41	0.6	0.38	0.39
最大等效应力/MPa	162	146	34.4	20.3
峰值时刻/ms	0.235	0.251	0.235	0.27

基于上述模型,开展了参数影响分析。选择台架的一阶垂向弯曲模态频率、结构阻尼系数 2 种参数分别进行对比计算,得到台架的最大变形和最大应力的变化曲线,如图 12 和图 13 所示。

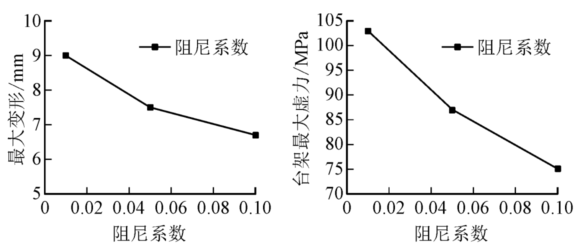


图 12 阻尼系数对台架响应峰值的影响曲线

Fig. 12 The influence curve of damping coefficient on the peak response of the platform

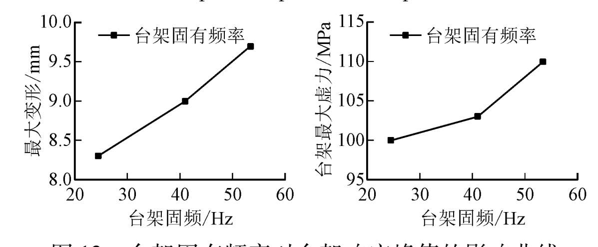


图 13 台架固有频率对台架响应峰值的影响曲线

Fig. 13 The influence curve of the natural frequency of the platform on the peak response of the platform

4 结 论

1)基于实测的航炮冲击波压力和经验公式,对炮口压力场分布函数进行了拟合,并考虑正压的作用时长差异性,模拟了真实炮口冲击波的传播规律。仿真结果与文献中的实测规律基本吻合,验证了拟合冲击压力场的有效性和可靠性。

2)考虑金属的材料非线性,采用非线性瞬态方法对某直升机台架在航炮冲击波作用下的动响应过程进行研究,结果表明最大变形出现在底部铝蒙皮的两侧区域,危险部位位于中骨架与钢制蒙皮的连接区。由于蒙皮变形吸收了大部分能量,除了底部蒙皮外,其余各部件动响应较小,整个台架未出现结构破坏。

3)台架的响应峰值与结构阻尼系数成反比,在25~50 Hz 的范围内,响应峰值与台架的一阶垂向弯曲模态频率成正比关系。因此,可以通过减小对应模态频率或者增大结构阻尼来降低台架的动响应。

4)通过上述方法,实现了航炮冲击波下的结构动响应预测,可以为相关的工程结构的设计提供参考,但由于仿真结果缺少试验数据对比,后续待开展相关试验后对计算模型进行优化。

参考文献:

[1] 刘巍. 武装直升机与航炮动力学研究[D]. 南京:南京理工大学,2009.

[2] 郭光海,韩普详. 航炮发射对设备影响的试验研究[J]. 直升机技术,2005(3):24-28.
GUO Guanghai,HAN Puxiang. Research on test that gun affect equipment when shotting[J]. Helicopter technigue,2005(3):24-28 (in Chinese).

[3] 钱聚瑛. 国外航炮的发展变化[J]. 现代兵器,1984(5):11-17.
QIAN Juying. Development and change of foreign aerial gun[J]. Modern weaponry,1984(5):11-17(in Chinese).

[4] 杨科之,刘盛. 空气冲击波传播和衰减研究进展[J]. 防护工程,2020,42(3):1-9.
YANG Kezhi,LIU Sheng. Research progress in propagation and attenuation of air shock wave[J]. Protective engineering,2020,42(3):1-9(in Chinese).

[5] 李鸿志,马大为. 膛口冲击波的远场传播规律[J]. 弹道学报,1992(11):25-29.
LI Hongzhi,MA Dawei. The propagating lows of muzzle blast far away from the gun[J]. Journal of ballistics,1992(11):25-29(in Chinese).

[6] 郭则庆,王杨,姜孝海,等. 膛口初始流场对火药燃气流场影响的数值研究[J]. 兵工学报,2012,33(6):663-668.
GUO Zeqing,WANG Yang,JIANG Xiaohai,et al. Numerical study on effects of precursor flow on muzzle propellant flow field[J]. Acta armamentarii,2012,33(6):663-668(in Chinese).

[7] 郭则庆,乔海涛,姜孝海. 内埋式航炮膛口流场特性数值模拟研究[J]. 兵工学报,2017,38(12):2373-2378.
GUO Zeqing,QIAO Haitao,JIANG Xiaohai. Numerical simulation of flow field characteristics in bore of buried aerial gun[J]. Acta armamentarii,2017,38(12):2373-2378(in Chinese).

[8] 朱冠南. 高空环境下膛口流场研究[D]. 南京:南京理工大学,2014.

[9] 朱冠南,王争论,马佳佳,等. 低压环境下膛口冲击波实验研究[J]. 兵工学报,2014,36(6):808-813.
ZHU Guannan,WANG Zhenglun,MA Jiajia,et al. Experimental study on muzzle shock wave under low pressure[J]. Acta armamentarii,2014,36(6):808-813(in Chinese).

[10] 刘嘉鑫,袁军堂,汪振华,等. 新型钛合金炮口制退器三维数值模拟与分析[J]. 兵器材料科学与工程,2019,42(2):31-34.
LIU Jiaxin,YUAN Juntang,WANG Zhenhua,et al. Three-dimensional numerical simulation and analysis of a new titanium alloy muzzle brake[J]. Ordnance material science and engineering,2019,42(2):31-34(in Chinese).

[11] 乐贵高,马大为,冯勇,等. 某火炮膛口流场数值仿真[J]. 兵工学报,2004,25(1):19-22.
LE Guigao,MA Dawei,FENG Yong,et al. Numerical simulation of muzzle blast flowfields of large caliber guns[J]. Acta armamentarii,2004,25(1):19-22(in Chinese).

[12] 于子平. 车载式火炮武器总体技术研究[D]. 南京:南京理工大学,2006.

[13] 贺奇龙. 某舰炮炮口冲击波对舰船船体的影响[J]. 船舶物资与市场,2021(4):25-28.
HE Qilong. Influence of gun muzzle shock wave on ship hull[J]. Marine equipment/materials & marketing,2021(4):25-28(in Chinese).

[14] 王文睿. 炮舱结构在冲击载荷作用下的振动特性分析[D]. 西安:西北工业大学,2007.

[15] 赵志彬. 飞机炮舱结构有限元静力分析及疲劳寿命估算[D]. 西安:西北工业大学,2007.

[16] 肖飞. 火炮射击时身管温度场测试研究[D]. 南京:南京理工大学,2005.

[17] 王娟. 基于虚拟样机技术的航炮系统动力学仿真研究[D]. 西安:西北工业大学,2004.

[18] 姬建荣,苏建军. 不同量级 TNT 爆炸冲击波正压时间的试验研究[J]. 科技技术与工程,2018,18(5):202-206.
JI Jianrong,SU Jianjun. Experimental study on the shock wave barotropic time of TNT explosion with different orders[J]. Science technology and engineering,2018,18(5):202-206(in Chinese).

[19] MCCARTHY D K. Analysis and test of gun blast resistant composite structure[M]. Arlington County,Virginia:Boeing Company,1998.

(编辑 李坤璐)